Der elektronenoptische Strahlengang eines Mehrfachoszillographen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

WERNER GÖRLING

aus Kuttlau (Schlesien)

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 1940

Tag der Promotion: 7. September 1940

Referenten: Dozent Dr. H i n d e r e r

Professor Dr. S c h u m a n n

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Der elektronenoptische Strahlengang eines Mehrfachoszillographen

Von den Kathodenoszillographen für Mehrfachaufnahmen, die in den letzten Jahren entwickelt oder vorgeschlagen wurden, nehmen die Konstruktionen eine Sonderstellung ein, die für sämtliche Meßsysteme eine gemeinsame Elektronenquelle verwenden. Mit ihnen allein lassen sich nämlich abgeschmolzene Mehrfachröhren, z.B. für sechs Vorgänge, technisch ausführen, während sonst ein komplizierter Aufbau und insbesondere die Vielzahl der notwendigen Zuführungen unüberwindliche Schwierigkeiten verursachen.

K n o l l (1) +) hat vorgeschlagen, von einem Strahlenerzeugungssystem mehrere getrennte Bündel dadurch auszusondern, daß die sogenannte Anodenblende statt einer mehrere Bohrungen erhält. Die Strahlbündelung erfolgt durch eine gemeinsame magnetische Linse, an deren optische Eigenschaften (ausnutzbare Apertur) offenbar besonders hohe Anforderungen zu stellen sind. Vorschläge, die Bündel durch Strahlteilung zu gewinnen, sind in der Folge mehrfach gemacht worden. H o l l m a n n (2) sieht die Verwendung von gekreuzten Zylinderlinsen, und zwar auch von einer Mehrzahl gleichartiger Zylinderlinsen, vor, um die Teilbündel zu Leuchtpunkten zusammenzuziehen. Auf die optischen Verhältnisse ist l.c. aber nicht genügend Rücksicht genommen, sodaß die Vorschläge nicht ausführbar sind. H i n d e r e r hat, ausgehend von seinem Mehrfachoszillographen nach dem Umschaltprinzip mit periodisch bewegtem Elektronenstrahl (3), eine Anordnung entwickelt, die sich dadurch auszeichnet, daß ein breites Elektronenbündel durch die Ablenkvorrichtungen selbst in Teilbündel zerlegt wird (4). Die Ablenkvorrichtungen befinden sich am Ort der Linse. Bei der endgültigen Ausführung verwendet Hinderer in Übereinstimmung mit dem unabhängigen, älteren Vorschlag von Hollmann Zylinderlinsen. Die praktische Ausführung unterscheidet sich aber von diesem Vorschlag wesentlich dadurch, daß folgerichtig die mehrfache Abbildung der Anodenblende in den Leuchtflecken bewirkt wird.

Verfasser hat sich der Aufgabe unterzogen, den Strahlengang des Mehrfachoszillographen nach Hinderer experimentell zu untersuchen, um aus der genauen Kenntnis des Strahlengangs und der Eigenschaften der verwendeten Linsen gegebenenfalls Richtlinien für Weiterentwicklung und Verbesserung des Mehrfachoszillographen zu gewinnen. Die Untersuchung der verwendeten astigmatischen Linsen dürfte zugleich einen kleinen Beitrag zur experimentellen Elektronenoptik darstellen.

Grundzüge des Strahlengangs beim Mehrfachoszillographen

Das oben angedeutete Prinzip der Strahlteilung läßt mehrere Ausführungen zu, die sämtlich erprobt wurden. Die einfachste ist diese: Von einem Kondensor ausgehend überdeckt der Querschnitt eines stark divergenten Elektronenbündels die dicht beieinander (neben- bzw. übereinander) angeordneten Ablenkkondensatoren. Dicht vor oder am Ort der Ablenkkondensatoren (Abb. 1) befindet sich

+) Die Zahlen in Klammern (.) beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß der Arbeit.

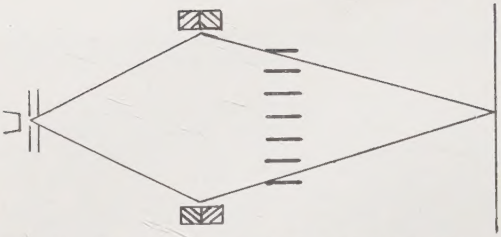

Abb. 1. Strahlengang des Mehrfachoszillographen mit rotationssymmetrischer magnetischer Linse.

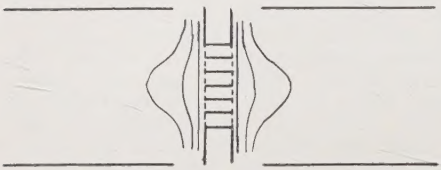

Abb. 2. Potentialverlauf beim Mehrfachoszillographen mit elektrischer Netzlinse.

die Linse, die die Elektronenquelle auf dem Leuchtschirm abbildet. Die Linse läßt sich durch eine verdrehungsfreie magnetische Linse oder durch eine elektrische Linse nach Art der Linsen mit Mittelnetz realisieren. Bei der elektrischen Linse ist das Kästchen, das die Ablenkkondensatoren enthält, gegenstandsseitig und gegebenenfalls auch bildseitig mit einem feinmaschigen Drahtnetz bedeckt (Abb. 2). Schwierigkeiten entstehen durch die Notwendigkeit, die ausgenutzte Apertur der Linse klein zu halten, da der Querschnitt des Bündels durch die Dimensionen der Ablenkvorrichtungen festgelegt ist. Bei Verwendung einer magnetischen Linse wird man diese zweckmäßig vor der Ablenkvorrichtung anordnen. Die Ablenkvorrichtung befindet sich dann im konvergenten Teil des Strahlengangs. Ist die Entfernung zwischen beiden Teilen außerdem so groß, daß das Magnetfeld der Linse nicht mehr merklich in den Bereich der Ablenkvorrichtungen hineinragt, so kommt auch die Einschränkung in Fortfall, daß die magnetische Linse eine verdrehungsfreie sein muß. Die einfache magnetische Linse hat gegenüber der verdrehungsfreien den Vorzug der geringeren Aberration und hat geringeren Strombedarf (5). Letzteres bedeutet, daß für dieselbe Brennweite größere Linsendurchmesser und kleinere ausgenutzte Aperturen angewandt werden können. Der Öffnungsfehler (Aberration) ist der hauptsächlich für die Abbildung der Anodenblende im Leuchtfleck in Betracht kommende Fehler. Bei der beschriebenen Anordnung erfolgt die Abbildung der punktförmigen Quelle in einem Bildpunkt. Erst wenn die Ablenkvorrichtungen verschiedene Spannungen führen, liefern die ausgesonderten Teilbündel getrennte Leuchtflecke; sonst ist eine gemeinsame Nullage vorhanden.

Ebenfalls gemeinsame Nullage und Verlauf der abgelenkten Bündel im feldfreien Raum läßt sich mit astigmatischen Systemen, für die Betrachtung am einfachsten mit gekreuzten Zylinderlinsen erzielen. Da die Hauptebenen beider Systeme nicht zusammenfallen müssen, wenn auf gleiches Abbildungsverhältnis in zueinander senkrechten Richtungen verzichtet werden kann, bringen Zylinderlinsen im Strahlengang des Mehrfachoszillographen wesentliche Vorteile. Legt man die z-Achse des zur Beschreibung dienenden Koordinatensystems in Richtung des unabgelenkten Symmetriestrahls (der von der Kathode ausgeht und senkrecht auf die ebene Auffangfläche auftrifft,) die Kondensatorplatten des Meßablenksystems übereinander in Ebenen parallel zur xz-Ebene, so kann man durch eine Zylinderlinse, die die Quelle in einer Brennlinie in y-Richtung auf dem Schirm abbildet, erreichen, daß das Bündel am Ort des Ablenksystems

in x-Richtung nur geringe Ausdehnung hat, in y-Richtung aber hinreichend breit ist, um sämtliche Ablenkvorrichtungen zu überdecken. Eine möglichst geringe Bündelbreite ist aber im Bereich der Ablenkkondensatoren von Bedeutung wegen der durch die Ablenkfelder hinzukommenden inhomogenen, veränderlichen Brechkraft. Ist der Mehrfachoszillograph für Trommelaufzeichnung konstruiert, und fehlt die Zeitablenkung oder kann diese näher zur Schirmseite angeordnet werden, wenn nur eine geringere Empfindlichkeit erforderlich ist, so kann sich die zweite, zur ersten gekreuzte Zylinderlinse zwischen Meßablenksystem und Leuchtschirm befinden und einen kleineren Abbildungsmaßstab in y-Richtung bewirken. Ungleiche Abbildungsverhältnisse in x- und y-Richtung können hinsichtlich der Fleckgröße durch entsprechende Bemessung der Anodenblende bzw. der Kathode - d.h. allgemein der Quelle - korrigiert werden. Stellt die Quelle zugleich die Aperturblende dar, bedeutet ein kleineres Abbildungsverhältnis, besonders wenn wie oben auf gleiche Bildgröße korrigiert wird, einen Gewinn an Lichtstärke.

Die Anordnung mit zwei gekreuzten Zylinderlinsen hat mit der entsprechenden Anordnung mit einer rotationssymmetrischen Linse den Nachteil gemeinsam, daß infolge der Gesamtdimensionen des Mehrfachablenksystems mindestens eine der beiden Linsen mit großer Apertur beaufschlagt wird. Diesem Nachteil kann man dadurch begegnen, daß man die zweite Zylinderlinse durch eine Vielzahl von Zylinderlinsen ersetzt (Abb. 3), und zwar durch ebensoviele Zylinderlinsen, wie Meßablenkkondensatoren vorhanden sind. Die Abbildung der Quelle erfolgt nun nicht mehr in einem, sondern in mehreren Punkten. Die Abbildung in y-Richtung erfolgt durch eine gemeinsame Zylinderlinse in einer Brennlinie, die Abbildung in x-Richtung in mehreren Brennlinien. Die Apertur verringert sich entsprechend der Zahl der Linsen. In seinem Mehrfachoszillographen hat Hinderer diesen Strahlengang angewandt. Aus konstruktiven Gründen - der glastechnische Aufbau war ja wesentlich zu berücksichtigen - wurden Mehrfachlinsen und Meßablenksystem vereinigt.

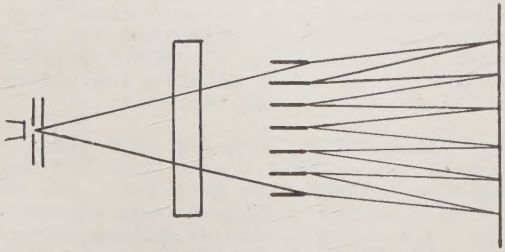

Abb. 3. Strahlengang des Mehrfachoszillographen mit Zylinderlinsen. Zweite Zylinderlinse aufgeteilt.

Die Elektronenstrahlröhre und die magnetischen Zylinderlinsen

Als Beleuchtungssystem dient eine indirekt geheizte kreisrunde flache Kathode von 2 mm Durchmesser, vor der sich im Abstand von 0,5 bzw. 1 mm zwei Lochblenden mit 1,5 mm Bohrung (schwach negativ gegen Kathode) und 0,5 mm Bohrung (Anodenblende) befinden. Die Kathode ist zur Abschirmung gegen die übrigen Zuführungsdrähte von einer zylindrischen Hülse (rd. 10 mm Durchmesser) umgeben, die auf der mittleren Blende aufgeschweißt ist. Die Öffnung der mittleren Blende hat die Funktion des Wehneltzylinders, der nicht mit der zylindrischen Abschirmung zu verwechseln ist.

Dieses Strahlerzeugungssystem, das sich in dieser Form häufig bei Elektronenstrahlröhren wiederfindet, dient zugleich als Intensitätsblende und Kondensor. In 50 mm Abstand von der Anodenblende sind zwei Ablenkplatten (20 x 30 mm) kathodenseitig mit 15 mm, schirmseitig mit 25 mm Abstand angeordnet. Diese Elektrode konnte als Zeitablenksystem und als elektrische Zylinderlinse verwendet werden.

Von der Anodenblende 150 mm entfernt ist das Mehrfachablenksystem für sechs Vorgänge angeordnet. Die Kondensatoren sind in einem Kästchen mit 25 x 35 mm Innenmaßen, 10 mm Tiefe und kreisförmigen Randscheiben von 55 mm Durchmesser übereinander untergebracht. Die Ablenkplatten sind nur 7 mm breit und nach außen durch 1,5 mm hohe Nasen der Trennbleche gegeneinander abgeschirmt, um gegenseitige Beeinflussung der Teilbündel zu vermeiden.

Mit dem Mehrfachablenksystem endet der zylindrische Teil der Röhre, an ihn schließt sich der kegelförmige (oder später birnenförmige) Kolben an, der als Grundfläche den Leuchtschirm enthält. Bis auf 20 mm Entfernung von Schirm und Mehrfachablenksystem ist die Wandung mit einer Silberverspiegelung oder einem Graphitbelag bedeckt, der die Gegenelektrode zu den Mehrfachzylinderlinsen bildet.

Statt der ersten, gemeinsamen elektrischen Zylinderlinse wurde auch eine magnetische Zylinderlinse verwendet, die aus vier Elektromagneten mit prismatischem Kern (10 x 10 x 50 mm) zusammengesetzt war. Im Winkelabstand von 90 Grad und radial verschiebbar waren die Magnete auf einem aufklappbaren Rahmen in Kreisringform montiert. Bei einer anderen Ausführung wurden Permanentmagnete derselben Dimensionen verwendet.

Eine dritte Form der magnetischen Zylinderlinse endlich wurde durch eisenfreie Spulen nach Art der in der Fernsehtechnik verwendeten Ablenkspulen gebildet. Die Spulen schmiegen sich der Halswandung eng an und bilden gewissermaßen die Berandung eines 1/4-Zylindermantels (55 mm Durchmesser, 50 mm Länge). Gewöhnlich werden zwei Spulen, in entgegengesetztem Sinn durchflossen, verwendet. Vier Spulen würden eine der oben beschriebenen Zylinderlinse mit Eisenkern entsprechende Anordnung ergeben (Abb. 4).

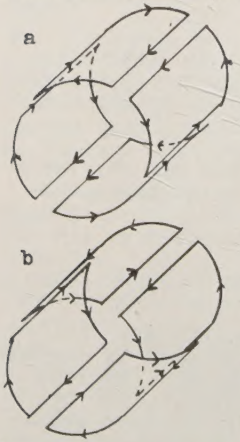

Abb. 4. Spulenpaare
a) mit gleichsinniger und
b) mit gekreuzter Linsenwirkung.

Eigenschaften der verwendeten Elektronenlinsen

In der vorhergehenden kurzen Darstellung wurde so verfahren, als ob außer rotationssymmetrischen nur Zylinderlinsen, und zwar positive Linsen mit reellem Brennpunkt, angewendet würden. Die nähere qualitative Betrachtung der oben beschriebenen magnetischen Zylinderlinse, die von Mylo (6) und Drewanz (7) angegeben wurde, zeigt aber sofort, daß es sich hier um eine kompliziertere Anordnung handelt. Die Linse wird durch zwei gleichstarke, einander gegenüberstehende Polpaare, zwei Nord- und senkrecht dazu zwei Südpole gebildet. Unabhän-

gig von der Brennweite wird ein Achsenpunkt im Bildraum zu einer Linie vereinigt, die konstant unter 45° gegen die Verbindungslinie der Pole geneigt ist. Ein gleichnamiges Magnetpaar allein hat dieselbe Wirkung.

Stellt man in beiden Richtungen gleichnamige Pole, also nur Nord- oder nur Südpole einander gegenüber, die man paarweise auf Abbildung der Quelle auf dem Leuchtschirm einreguliert hat, so beobachtet man im Zusammenwirken beider Paare eine annähernde Aufhebung der Linsenwirkung, während Abbildung durch gekreuzte Zylinderlinsen zu erwarten wäre. Das entsprechende Bild der Quelle entsteht erst bei erheblich höheren Spulenströmen bei gleichen Abständen. Aus diesem Versuch läßt sich schließen, daß mit der Sammellinse in der einen Richtung eine Zerstreuungslinse in der dazu senkrechten verbunden ist, und zwar von gleicher Brennweite. Eine Messung der Brennweiten in beiden Richtungen bestätigt dies. Die Brennweite der Sammellinse wurde aus der Lage von Gegenstandspunkt und Bildlinie, die der Zerstreuungslinse aus der Verbreiterung des Strahlbündels, das durch eine Blende festgelegt war, bestimmt. Die letzte Messung ließ sich nur wesentlich ungenauer ausführen.

Spulenstrom (A)	Brennweite der Sammellinse (mm)	Brennweite der Zerstreuungslinse (mm)
0,57	4,44	5,0
0,51	5,09	3,7
0,45	5,82	6,2
0,40	6,26	10,1
0,35	7,07	7,3
0,30	8,24	12,7
0,25	9,48	13,3
0,21	11,05	

Im Vergleich mit der Theorie wirkt die Feststellung einer Zerstreuungslinse zunächst überraschend. Die Brennweite für die magnetische Zylinderlinse ergibt sich nämlich angenähert (8)

$$\frac{1}{f^{b}_{magn}} = \frac{1}{2}\left(\frac{mv}{-e}\right)\int_{z_g}^{z_b} \frac{A_x'^2(\xi)}{\sqrt{\left(\frac{mv}{-e}\right)^2 - A_x^2(\xi)^3}}\, d\xi$$

bei spiegelbildlicher Brechungszahl und

$$\frac{1}{f^{b}_{magn.}} = \left(\frac{-e}{mv}\right)^2\int_{z_g}^{z_b} \mathcal{H}_z^2(\xi)\, d\xi + \left(\frac{-e}{mv}\right)^4\int_{z_g}^{z_b} \mathcal{H}_z^2(\xi)\left[\int_{z_g}^{\xi}\left[\int_{\xi_1}^{z_b} \mathcal{H}_z^2(\xi_{11})\, d\xi_{11} - \int_{\xi}^{z_b} \mathcal{H}_z^2(\xi_{11})\, d\xi_{11}\right] d\xi_1\right] d\xi$$

bei spiegelsymmetrischem Feld (A das Vektorpotential). Wenn die Brechungszahl im Objekt- und Bildraum konstant ist, ergibt sich aus den Formeln auch für magnetische Zylinderlinsen stets eine positive Brennweite. Obwohl nun Magnetfeld bzw. Brechzahl in Objekt- und Bildraum konstant sind und sogar verschwinden, steht die Feststellung einer Zerstreuungslinse nicht im Widerspruch zur Theorie: Dort sind unter Zylinderlinsen in Anlehnung an die lichtoptischen Verhältnisse solche Anordnungen verstanden, die sich zweidimensional als Schnitt unendlich ausgedehnter prismatischer Gebilde behandeln lassen. Die allgemeinen Feststellungen über Zylinderlin-

sen bei P i c h t (8) beziehen sich auf lange Anordnungen, für die sehr lange Schlitzblendenlinsen und magnetische Linsen, gebildet durch erhebliche Dehnung rotationssymmetrischer Magnetlinsen in Richtung eines Durchmessers zu einer sehr langen Schleife, Beispiele darstellen. Wenn die Anordnungen von Mylo und Drewanz auf Grund ihrer Wirkungsweise kurz als gekreuzte Zylinderlinsen beschrieben werden, ohne daß hier eine theoretische Behandlung gebracht wird, so mögen doch noch einige Hinweise zu ihrem Verständnis angeschlossen werden.

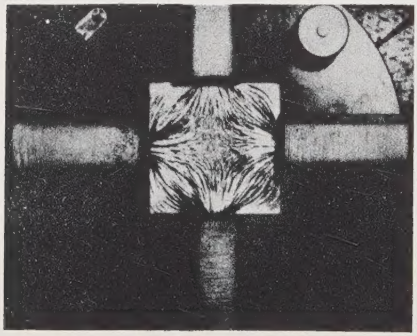

Abb. 5. Kraftlinienbild der magnetischen Zylinderlinse.

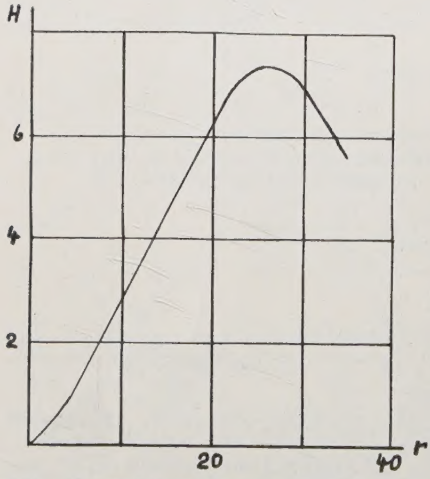

Abb. 6. Feldstärke in einer Diagonale des Schnittes Abb. 5.

Abb. 5 zeigt hierzu den Feldverlauf in der Polebene, Abb. 6 den Abfall der Feldstärke in einer Diagonale desselben Schnittes. Als Abszissen sind dabei die Entfernungen vom Mittelpunkt aufgetragen. Ist der Strahlengang derart, daß die Systemachse senkrecht auf dem Mittelpunkt der Polschnittebenen steht, und ist der Gegenstand ein Punkt auf der Achse, so sieht man sofort, daß Strahlen, die ursprünglich in den beiden Ebenen verliefen, die durch die Diagonalen der Polschnittebenen und der Achse festgelegt, auch nach Durchgang durch die Linse in derselben Ebenen bleiben. Sie erfahren lediglich Krümmungen zur Achse hin oder von der Achse fort, und zwar notwendig so, daß der Sinn der Ablenkung in den beiden Diagonalen entgegengesetzt ist. In Abb. 7 ist dies angedeutet. Die einfachen Pfeile stellen die Feldrichtung, die doppelten den Krümmungssinn dar. Damit ist auch verständlich, daß die Linse verdrehungsfrei bzw. mit konstanter Verdrehung arbeitet.

Läßt sich die Feldanordnung entsprechend ihrer Wirkungsweise mit einer Zylindersammel- und einer dazu senkrechten Zerstreuungslinse vergleichen, so gibt die Betrachtung der oben erwähnten Anordnung mit eisenfreien Spulen einen weiteren Zusammenhang. Verfolgt man nämlich den Umlaufssinn der Ströme, so sieht man, daß die Ströme in den geradlinigen Leiterstücken sich addieren, wenn die Spulen als gleichsinnig sich verstärkendes Linsenpaar geschaltet sind (Abb. 4a). Wenn die Spulenpaare dagegen entsprechend Abb. 4b als gekreuzte Zylinderlinsen vom Strom durchflossen werden, heben sich die Magnetfelder von den geradlinigen Leiterstücken im Außenraum auf.

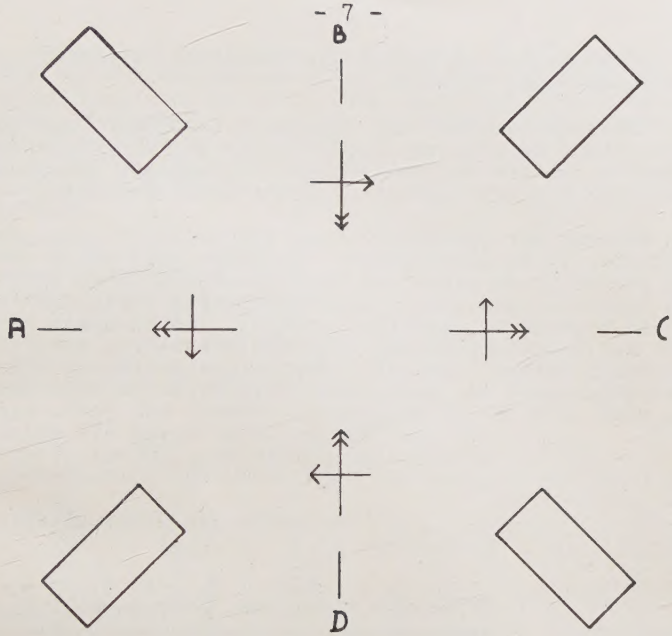

Abb. 7. Ablenkrichtung in den Diagonalebenen.

Übrig bleiben im zuletzt genannten Fall zwei in entgegengesetztem Sinn durchflossene Kreisringe: eine verdrehungsfreie rotationssymmetrische magnetische Linse. Bei der ersten Anordnung (Abb. 4a) erhält man, wenn man Kreisbogen aus beiden Kreisen austauscht, ebenfalls eine zusätzliche verdrehungsfreie Linse. So wird auch der bereits mitgeteilte experimentelle Befund verständlich, daß sich mit der gekreuzten Anordnung bei wesentlich höheren Amperewindungszahlen ein Bild erzeugen läßt.

Die ausnutzbare Öffnung ist bei der magnetischen Linse größer als bei der elektrischen Zylinderlinse, sodaß die letztere gewöhnlich nicht oder nur in Verbindung mit der magnetischen angewandt wurde. Hinzu kommt, daß die magnetische Anordnung und damit ihr fehlerfreier Bereich durch Vergrößerung der Dimensionen fast beliebig erweitert werden kann und ferner, daß die Justierung im Gegensatz zur elektrischen Anordnung jederzeit korrigierbar ist.

Bei den ersten Anordnungen des Sechsstrahloszillographen zeigten die äußeren Leuchtflecke erhebliche Unschärfen, deren Ursache sich zunächst nicht angeben ließ. Die magnetische Zylinderlinse als das am leichtesten zugängliche Element des Strahlengangs wurde deshalb auf ihre Fehler untersucht. Dazu diente ein Versuchsrohr mit magnetisch verschiebbarem, ebenem Schirm mit Millimetereinteilung einer ebenfalls in einer Richtung verschiebbaren und durch Anschlag genau zentrierbaren Blende und einem normalen Beleuchtungssystem. Die Blende war leicht auswechselbar.

Ein Teil der Röhre ist im Innern zur Vermeidung von Wandladungen mit einer Abschirmung versehen.

Von Interesse war es, die Fläche zu bestimmen, auf der die Brennlinie scharf zu erhalten ist. Ferner wurden untersucht der Öffnungsfehler und die Bildfeldwölbung (sinngemäß übertragen aus den Seidelschen Fehlern rotationssymmetrischer Linsen).

Die Messung der Bildfeldwölbung wurde derart vorgenommen, daß die Blende (4 mm Durchmesser) um einen bestimmten Betrag und die Linse ebenfalls um einen aus Blendenverschiebung, Blendenabstand und Linsenabstand sich ergebenden Betrag verschoben wurde. So wurde die notwendige Bedingung erfüllt, daß sich bei zentrierter Blende der Gegenstandspunkt in einer Geraden in derselben Gegenstandsebenen bewegt. Bei der vierpoligen Anordnung lag die Bildfeldwölbung unter der Meßgrenze. Die Werte für die zweipolige Anordnung sind Abb. 8 zu entnehmen. Sowohl bei vier- als auch bei zweipoliger Linse wurde die Fläche der scharfen Bildlinie bis 20^0 als eben festgestellt.

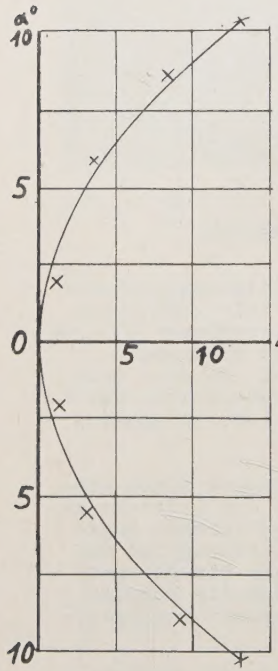

Abb. 8. Bildfeldwölbung der zweipoligen Magnetlinse.

Die Werte für den Öffnungsfehler sind folgende:

2 Pole		4 Pole	
Öffnungsw.	Längsabw.	Öffnungsw.	Längsabweichg.
8^0	3,3	$4,6^0$	1,6
$12,7^0$	8,0	8^0	2,9
16^0	10,6	$11,3^0$	3,6
$20,9^0$	13,8		

Die Längsabweichung ist dabei in Prozenten der Brennweite der achsennahen Strahlen angegeben.

Die Mehrfachzylinderlinse, die zusammen mit der ersten Linse die Abbildung in mehreren Punkten bewirkt, wird durch positive Aufladung des leitenden Belages der Kolbenwandung gegen das Abschirmkästchen gewonnen. Im hauptsächlich interessierenden Schnitt ist ihr Potentialverlauf in Abb. 9 wiedergegeben. Die Äquipotentialflächen wurden am vergrößerten Modell im elektrolytischen Trog aufgenommen.

Man kann diese Feldanordnung als eine Netzlinse (9) ansprechen, die als ganzes rotationssymmetrisch gebildet ist, während ihre Elementarlinsen angenähert durch gekreuzte positive Zylinderlinsen mit verschiedenen Brennweiten beschrieben werden können. In Bezug auf das Gesamtbündel wirkt die Anordnung als Zerstreuungslinse, in Bezug auf die Teilbündel als Sammellinse. Bekanntlich lassen sich mit rotationssymmetrischen Feldern, die der Laplaceschen Differentialgleichung genügen, nur Sammellinsen her-

stellen. Die Netzlinse bildet eine deshalb widerspruchsfreie Ausnahme, weil ihre Elementarlinsen im Zusammenwirken mit der Gesamtlinse Sammellinsen darstellen. Eine ungefähre experimentelle Bestimmung der Brennweiten ergab die folgenden Werte (genauere Ermittlung der Brennweiten und Hauptebenen bzw. Knotenpunkte war an den vorhandenen Modellen nicht durchführbar):

In der Tabelle bedeuten: U die Spannung der Linse (die Anodenspannung betrug bei allen Messungen 2 000 Volt), f_z die Brennweite der rotationssymmetrischen Zerstreuungslinse, f_{s1} und f_{s2} die Brennweiten der Elementarlinsen.

U	f_z	f_{s1}	f_{s2}
410	- 55	50	57
750	- 33	30	35
1220	- 21	18,4	21,4
1600	- 18,7	16	19,1
1930	- 17,6	18,8	18,0
2120	- 16,6	13,8	16,9

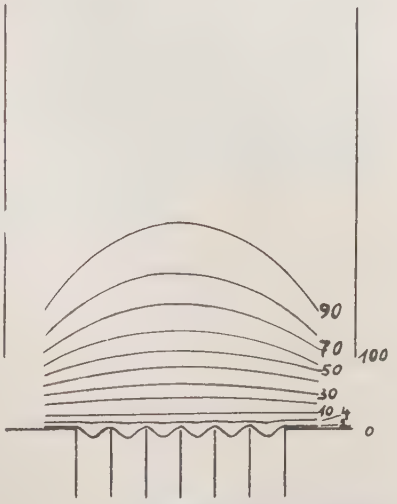

Abb. 9. Potentialverlauf bei der Mehrfachlinse.

Die Brennweite der Zerstreuungslinse läßt sich übrigens auch durch die bekannte Näherungsformel von Davisson und Calbick

$$\frac{1}{f^b} = \frac{\Phi_N \, \Phi_B}{4 \, \Delta \cdot \Phi_B}$$

(Φ_N ist hierbei der Potentialwert am Kästchen, Φ_B der der letzten berücksichtigten Äquipotentialfläche, Δ der Abstand dazwischen) leicht angeben oder durch die genauere von Picht:

$$\frac{1}{f^b} = \frac{\Phi_N - \Phi_B}{4 \, \Delta \cdot \Phi_B} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Phi_N}{\Phi_B}} \right).$$

Genauere Werte würde natürlich eine Formel liefern, die den wirklichen Potentialverlauf berücksichtigt (10).

Die Wirkungsweise der Gesamtanordnung

Nach Kenntnis der Aufbauelemente kann der auf S. 3 angegebene Strahlengang präzisiert werden. Wir verfolgen den Strahlengang in zwei Schnittebenen, die die Achse enthalten und senkrecht (S) oder parallel (P) zu den Ablenkplatten liegen. Von der Kathode beginnend enthält S eine Zerstreuungslinse (magnetische Zylinderlinse), in weiterem Abstand eine Sammellinse und eine schwächere Zerstreuungslinse. Der Strahlengang wird teleskopisch, die Kathode scheint näher an das Ablenksystem herangerückt und die

Divergenz des Bündels vor dem Ablenksystem wird vergrößert - ein Vorteil, da es schwierig ist, sehr weite Bündel mit dem Kondensorsystem herzustellen. Der Abbildungsmaßstab bleibt dadurch, daß sich die Sammellinsen des Ablenkkästchens in Schirmnähe befinden, genügend klein. Die letzte Zerstreuungslinse ergibt mit der vorhergehenden Sammellinse eine vergrößerte positive Brennweite.

Ebenfalls von der Kathode aus enthält der P-Schnitt eine Sammellinse (magnetische Zylinderlinse), eine schwache Sammel- und eine Zerstreuungslinse. Die beiden letzteren rücken die Hauptebenen etwas zur Schirmseite und verkleinern so den Abbildungsmaßstab.

Beim abgelenkten Strahl kommt durch das Kondensatorfeld eine weitere Beeinflussung der Teilbündel hinzu, die von R e c k n a g e l (11) mit einer prismatischen und einer doppelten Zylinderlinsenwirkung verglichen wird. H e r z o g (12) hat diese Randwirkungen durch Betrachtung des idealisierten Potentialsprungs, eines auf unendlich dünnem Raum lokalisierten Streufeldes berechnet. In den Untersuchungen ist auch der hier interessierende Fall enthalten, daß die Ablenkplatten zusätzlich eine konstante Potentialdifferenz gegen den Außenraum (hier die Wandelektrode) aufweisen.

Konstruktionsverbesserungen am Mehrfachoszillographen

Auf S. 7 wurden Fleckunschärfen erwähnt, die den Anlaß zur Untersuchung der Aufbauelemente gaben. Die unscharfe Abbildung der äußeren Bündel ließ sich auf zwei Ursachen zurückführen: auf schiefen Einfall in das Ablenkkästchen und auf den Einfluß der Randzonen der rotationssymmetrischen Zerstreuungslinse. Der Fehler wäre durch Verkleinerung der Öffnung des Ablenkkästchens bei Konstanthaltung der übrigen Dimensionen allein zu beseitigen gewesen, doch hätten sich darauf insbesondere für das abgelenkte Bündel (Fehler vom Kondensatorfeld) Nachteile ergeben. Deshalb wurden drei Maßnahmen getroffen: Vergrößerung des Durchmessers der Gegenelektrode des Wandbelages durch birnenförmigen Kolben, Vergrößerung des Abstandes Ablenkkästchen - Strahlerzeugungssystem und Verkleinerung der Kästchenöffnung auf 25 x 25 mm. Besondere Aufmerksamkeit wurde noch der Zeitablenkung zugewendet. Der Ort des Zeitablenksystems ist durch den Strahlengang eindeutig festgelegt: Die Lagenänderung des Bündels soll am Ort des Mehrfachablenksystems wegen seines inhomogenen Feldes möglichst gering sein, andererseits muß sich das Zeitablenksystem kathodenseitig befinden. Unter geeigneter Abschirmung war das Zeitablenksystem demnach unmittelbar vor dem Ablenkkästchen anzuordnen.

Die Oszillogramme Abb. 10 und 11, die als Trommelaufnahmen bzw. mit elektrischer Zeitablenkung hergestellt wurden, geben ein Beispiel für die Brauchbarkeit der Konstruktion.

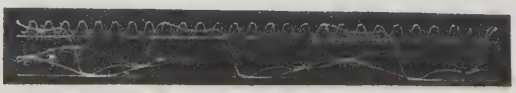

Abb. 10. Oszillogramm (Trommelaufnahme).

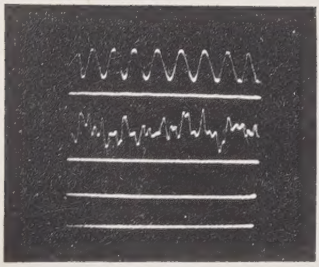

Abb. 11. Oszillogramm (elektrische Zeitablenkung).

Zusammenfassung

Es werden die möglichen Strahlengänge aufgewiesen, die sich bei dem Mehrfachoszillographen nach dem Strahlteilungsverfahren ergeben. Die besonderen Eigenschaften der Anordnungen mit Zylinderlinsen werden behandelt. Auf die Bedeutung der Apertur wird hingewiesen. Es wird gezeigt, daß sich durch Aufteilung der zweiten Linse die Apertur verringern läßt.

Die Eigenschaften der verwendeten Linsen werden untersucht und beschrieben. Die magnetische Linse läßt sich als ein System von gekreuzten Zylinderlinsen, und zwar einer Zerstreuungs- und einer Sammellinse gleicher Brennweite, darstellen. Der Zusammenhang mit der verdrehungsfreien Linse wird aufgewiesen. Die elektrische Mehrfachlinse wird mit einer Netzlinse verglichen, deren Elementarlinsen paarweise verschiedene, gekreuzte Zylinderlinsen bilden.

Aus der Kenntnis der Aufbauelemente wird eine genaue Beschreibung des Strahlenganges gegeben. Es werden Verbesserungen vorgeschlagen, die die Unschärfen der äußeren Leuchtflecke und deren Ablenkfehler beseitigen. An Oszillogrammen wird die Brauchbarkeit der Konstruktion gezeigt.

Schrifttumsverzeichnis

(1) M. Knoll, ETZ 53, S. 1101

(2) DRP a. H 145 661

(3) DRP 677 702

(4) H. Hinderer, Arch. Elektrotechn. erscheint demnächst

(5) Wallraff u. Becker, Arch. Elektrotechn. 34 (194), S.115

(6) DRP 371 528

(7) DRP a. 64 381

(8) Picht, Einführung in die Theorie der Elektronenoptik. S. 145

(9) Picht, Ann. Phys. 36 (1939), S. 249

(10) Knoll u. Weichardt, Z. Phys. 110 (1938), S. 233

(11) Recknager, Z. Phys. 111 (1938), S. 61

(12) Herzog, Z. Phys. 113 (1939), S. 166

Die vorliegende Arbeit wurde im II. Physikalischen Institut der Universität Berlin ausgeführt. Für die Anregung dazu und viele wertvolle Ratschläge bei der Durchführung bin ich Herrn Dozent Dr. H. H i n d e r e r zu großem Dank verpflichtet. Zugleich möchte ich an dieser Stelle dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr. S c h u m a n n, für die Erlaubnis, in seinem Institut arbeiten zu dürfen, und für vielfache Förderung meinen Dank aussprechen.

Lebenslauf

Ich, Werner Görling, bin am 10. Februar 1915 in Kuttlau in Schlesien als Sohn des Kaufmanns Fritz Görling und seiner Ehefrau Marie, geb. Kobitzsch geboren.

Nach dreijährigem Besuch der dortigen Volksschule kam ich Ostern 1924 an das Staatl. Gymnasium (Johanneum) in Liegnitz. Ab Oktober 1931 besuchte ich das Kaiserin-Augusta-Gymnasium in Berlin-Charlottenburg, wo ich im März 1934 die Reifeprüfung ablegte. Nach Ableistung meiner Arbeitsdienstpflicht begann ich im Wintersemester 1934/35 mein Studium an der Universität Berlin. Zwischendurch war ich zwei Semester an der Universität Jena immatrikuliert. Ich hörte Vorlesungen über Physik, Mathematik und Chemie.

Seit August 1939 bin ich bei einem Infanterieregiment im Felde.

Herstellung: V D I - Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7